
Kürzliche Fortschritte im Bereich der Hochtemperatur-Supraleitung

K. Alex Müller

Fortschritte in den letzten drei bis vier Jahren auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Supraleitung werden vorgestellt. Neben fundamentalen Themen der Grundlagenforschung wie Symmetrie der Paarwellenfunktion, Phasenseparation und magnetisches Phasendiagramm werden auch aktuelle Probleme der Materialherstellung sowie interessante Perspektiven in den technischen Anwendungen im Bereich Hochstromtechnik und Mikroelektronik beleuchtet. Dabei wird besonders Bezug auf Forschungsarbeiten von Zürcher Gruppen genommen, welche vor allem in der Grundlagenforschung und Materialherstellung wesentliche Beiträge geliefert haben.

1 EINLEITUNG

An der grossen Hochtemperatur- und Material-Supraleiterkonferenz in Kinazawa (Japan) 1991 hat der Autor die Entwicklung der Forschung in den ersten fünf Jahren seit der Entdeckung der Kupratsupraleitung zusammengefasst (1). Seither haben sich sowohl in der Grundlagen- als auch bei der anwendungsorientierten Forschung einige wesentlich neue Aspekte ergeben, die schon damals andeutungsweise erörtert worden sind. Es ist die Absicht dieses Beitrages, dieselben zusammenzufassen und ihre Relevanz zur Naturbeschreibung bezüglich ihres fundamentalen Charakters hervorzuheben, wie auch die bei ihrer Anwendung zu erzielende Verbesserung der Umweltbelastung gegenüber der herkömmlichen Technik.

Zwei wichtige, für die Supraleitung neue mögliche Verhaltensweisen sind einerseits ein Grundzustand des makroskopischen Quantenzustandes, welcher vom bisherigen der klassischen Supraleiter abweicht, andererseits die Existenz eines intrinsisch inhomogenen Zustandes, der sowohl in der normalleitenden als auch in der supraleitenden Phase vorhanden sein kann. Dazu kommt noch ein gänzlich neues Verhalten des Kondensates beim Anlegen eines äusseren Magnetfeldes mit dem Vorhandensein eines Irreversibilitätsbereiches, d. h. die Abwesenheit eines thermodynamisch eindeutig charakterisierten Gleichgewichtes. Diese drei teilweise ganz neuen Aspekte werden zuerst beschrieben.

Die Suche nach Kupferoxyden mit höherer Sprungtemperatur wurde kürzlich in Zürich mit Erfolg gekrönt. Um die Eigenschaften dieser neuen Verbindungen zu bestimmen, werden Einkristalle benötigt. Wegen der komplizierten Kristallstruktur können diese bis jetzt nur sehr klein gezüchtet werden. Trotzdem gelingt

es, an diesen Kriställchen die elektrischen Transporteigenschaften und ihr magnetisches Verhalten präzise zu messen. Auch im Bereich der Erzeugung epitaktischer Schichten auf geeigneten Substraten wurden erhebliche Fortschritte erzielt. Über diese Entwicklung wird im zweiten Teil dieses Beitrages berichtet.

Seit der Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung haben sich bei den möglichen Anwendungen zwei Gebiete abgezeichnet. Beim ersten sind grosse elektrische Ströme vorhanden: ihr Transport mittels Kabel sowohl als ihre Begrenzung bei Kurzschlüssen, bei den mit Strömen erzeugten hohen Magnetfeldern sowie bei der Herstellung von Transformatoren und Motoren. Als zweites Gebiet ist die Mikroelektronik zu nennen. Hier sind die Erstellung von Hochfrequenzresonatoren höchster Güte, Schaltungen, die eine Messung extrem kleiner Magnetfelder gestatten, und sehr rasche Schalter hervorzuheben. Deren teilweise imminente Kommerzialisierung steht bevor. Der dritte Teil dieses Beitrages befasst sich mit diesen Anwendungen und ihren Aussichten.

2 DAS VERTIEFTE VERSTÄNDNIS DES PHÄNOMENS

2.1 Die Symmetrie des Grundzustandes

Supraleitung ist ein *makroskopischer Quantenzustand* der Materie. Analog den Quantenzuständen im Atom können sich diese Zustände nur in endlichen Einheiten ändern, etwa in einem supraleitenden Ring der magnetische Fluss. Bei den klassischen Supraleitern wird ihr Zustand durch eine komplexe makroskopische Wellenfunktion $\psi(R)$ beschrieben

$$\psi(R) = \rho(R)^{1/2} e^{i\varphi(R)},$$

wobei $\rho(R)$ die Dichte und $\varphi(R)$ die Phase des Kondensates am Punkt mit Radiusvektor R bedeuten. Alle makroskopischen Eigenschaften des Supraleiters werden durch $\psi(R)$ bestimmt, wie die oben beschriebene Flussquantisierung.

Mikroskopisch existieren im Kondensat Cooperpaare von je zwei Ladungsträgern mit antiparallelem Impuls und Spin über eine Kohärenzlänge $\zeta(r)$. Die Paarwellenfunktion wird durch eine Produktfunktion

$$\Psi(r, R) = \Phi(r) \times \psi(R)$$

beschrieben, wobei $\Phi(r)$ die interne Struktur des Paares über $\zeta(r)$ angibt. Die mikroskopischen Eigenschaften werden durch $\Phi(r)$ bestimmt. Bei allen bisherigen Supraleitern ist $\Phi(r)$ eine symmetrische Funktion, welche ein Maximum bei $r = 0$ aufweist und über $\zeta(r)$, die Grösse des Cooperpaares, abfällt (sogenannte s-Welle).

Bei den Kupferoxydsupraleitern haben neuere Theorien für verschiedene Paarungsmechanismen eine andere Symmetrie vorhergesagt, welche nicht isotrop ist, sondern im einfachsten Fall entsprechend einer d-Wellenfunktion transformiert: Die Kuprate besitzen alle eine nahezu tetragonale Symmetrie.

Wählen wir die tetragonale c-Achse dieser Kristalle parallel der z-Achse vom Radiusvektor $r(x, y, z)$, so hat in einem rechtwinkligen Koordinatensystem $\Phi(r)$ eine Symmetrie, die wie $x^2 - y^2$ transformiert, wobei die x- und y-Achsen senkrecht zur z-Achse orientiert sind. Entsprechend dieser Symmetrie ist $\Phi(r)$ positiv entlang der x-Achse, negativ entlang y und null entlang den $|x| = |y|$ Richtungen.

Eine grosse Anzahl von ganz verschiedenen Experimenten können im Prinzip zwischen der s- und der d-Wellensymmetrie unterscheiden. Diese Experimente ergaben sehr widersprüchliche Ergebnisse und führten zu einer erheblichen Kontroverse, die in den Vereinigten Staaten sehr emotionell geführt wird. Der Autor hat nun kürzlich in einer Notiz darauf hingewiesen, dass man bei einer Annahme von *zwei koexistierenden Komponenten des Kondensates* die sehr aussagekräftigen Tunnelexperimente widerspruchlos erklären kann (2). Es sind dies sowohl eine s- als auch eine d-Komponente, wobei die erstere eine um eine Grössenordnung kleinere Kohärenzlänge aufweisen dürfte als die zweite. Auch andere Experimente sind mit dieser Annahme kompatibel.

2.2 Phasenseparation

Die Kupferoxydsupraleiter unterscheiden sich festkörperphysikalisch sehr wesentlich von den klassischen metallischen Supraleitern. Bei letzteren sind pro Einheitszelle ein bis mehrere sogenannte «freie» Ladungsträger vorhanden, welche unterhalb der Phasenumwandlungstemperatur kondensieren. Die Kupratsupraleiter sind hingegen *antiferromagnetische Isolatoren*, welche mit nur 10–20% Ladungsträgern pro Einheitszelle dotiert sind. Ausserdem sind es Schichtstrukturen, welche schachbrettartige CuO_2 -Schichten enthalten. In diesen befinden sich die beweglichen Ladungsträger, welche demzufolge in einem quasi zweidimensionalen «Quantental» gefangen sind. Die Einheitszelle in den neuen Substanzen besitzt oft eine Grössenordnung mehr Atome als die supraleitenden Metalle. Bei der Verbindung $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, mit einer der kleinsten Einheitszellen, sind es 13. Somit ist die Ladungsträgerkonzentration wegen der Dotierung und der Grösse der Einheitszelle bis zu zwei Grössenordnungen kleiner als in einem Metall. Dementsprechend ist die kinetische Energie (die sogenannte Fermienergie) bei den Kupferoxydleitern viel kleiner. Überdies existiert an Orte der Kupfer- und Sauerstoffionen, wo die Ladungsträger eine erhebliche Aufenthaltswahrscheinlichkeit haben, eine grosse elektrische Korrelationsenergie, d. h. zwei Ladungsträger am gleichen Orte anzutreffen ist sehr unwahrscheinlich. Eine kleine kinetische und eine grosse Korrelationsenergie ergibt eine Tendenz zur Lokalisation der Ladungsträger. Mit der letzteren ist die Erzeugung von Quasiteilchen mit mittlerer effektiver Masse verbunden, sogenannten mittleren Polaronen.

Das oben geschilderte Verhalten führt zur möglichen Bildung einer Phasenseparation mit einerseits verlangsamt beweglichen Polaronen und andererseits

hochbeweglichen Fermiteilchen. Die Polaronen haben sowohl elektrischen als auch magnetischen Charakter, welcher durch die Korrelation bedingt ist. Diese Phasenseparation sollte von mesoskopischem Ausmass sein, im Gegensatz zu der von P.W. Anderson 1987 vorgeschlagenen atomistischen Separation in elektrisch geladene, unmagnetische «Holonen» und elektrisch ungeladene, magnetische «Spinonen».

Beginnend mit theoretischen Vorschlägen an den Universitäten in Stuttgart, Rom und dem Brookhaven National Laboratory, wurde die Möglichkeit einer elektrisch ausgelösten Phasenseparation in Workshops 1992 und 1993 diskutiert (3), mit Einbezug der als relevant erachteten Experimente. Hierbei hat sich von der experimentellen Seite mittels harter Röntgenstreuung der mögliche Nachweis dieser Separation an zwei verschiedenen Verbindungen durch A. Bianconi in Rom ergeben. Nach seinen Resultaten zeigen sich in den CuO_2 -Ebenen alternierende Streifen von Polaronen mit solchen von metallischem Charakter. Die Breite der Streifen ist ca. 10 \AA und entspricht der supraleitenden Kohärenzlänge in den CuO_2 -Ebenen. Auch Suszeptibilitätsmessungen in wenig dotierten Materialien konnten durch eine amerikanische Gruppe in der obgenannten Weise gut interpretiert werden. Dies ist auch der Fall bei einer Wiederinterpretation von mit Neutronenstreuung beobachteten Überstrukturlinien am Brookhaven National Laboratory. Es gibt noch weitere Beobachtungen, die jedoch den Rahmen dieser Aufzählung sprengen würden.

Die beschriebene Phasenseparation ist noch nicht allgemein anerkannt, gewinnt aber ständig an Boden. Sie ist dynamisch und nicht statisch zu verstehen und wird mit harter Röntgenstrahlung, welche eine Zeitkonstante von 10^{-14} Sekunden aufweist, instantan abgebildet. Demgegenüber scheint die magnetische Kernresonanz diese Phasenseparation mit ihrer Zeitkonstanten von $10^{-3} - 10^{-6}$ Sekunden nicht «sehen» zu können. Diese Methode integriert über das dynamische Verhalten und täuscht möglicherweise die von ihr beobachtete homogene Phase nur vor.

2.3 Das Eindringen von Magnetfeldern

Es wurde schon früh erkannt, dass die Kuprate sogenannte extreme Typ II-Supraleiter sind. Dies bedeutet, dass die vorher definierte Kohärenzlänge ξ wesentlich kleiner als die von London eingeführte magnetische Eindringtiefe λ ist; $\xi/\lambda \ll 1$. Hierbei können schon bei relativ kleinen äusseren Magnetfeldern magnetische Flussschläuche in den Supraleiter eindringen (bei Typ I-Supraleitern mit $\xi/\lambda \gg 1$ dringt kein magnetischer Fluss ein).

Neu ist nun die Erkenntnis, dass bei den Kupferoxyden diese Flussschläuche nicht starr sind, wie dies bei den klassischen Typ II-Supraleitern der Fall ist, sondern eine Beweglichkeit in seitlicher Richtung des Schlauches existiert. Diese rührt von der sehr anisotropen Art der Supraleitung her, welche sich in den

CuO₂-Ebenen abspielt. Diese Schichtebenen sind elektronisch fast entkoppelt, insbesondere bei den Oxiden mit höchstem Sprungpunkt. Man kann sich den Unterschied zwischen den Flussschläuchen bei klassischen Supraleitern und den Kupraten als starre ungekochte und weiche gekochte Spaghetti vorstellen, wobei bei den letzteren die Spaghettiteilstücke leicht seitlich parallel den CuO₂-Ebenen beweglich sind.

Erst beim Abkühlen weit unterhalb von T_c erstarrt das Vortexsystem in einen festen, gelegentlich geordneten, aber unter Umständen auch ungeordneten Zustand. Die «flüssige» Hochtemperatur-Vortexphase wird im Magnetfeld-Temperatur-Phasendiagramm durch die sogenannte Irreversibilitätslinie von der festen «glasartigen» Vortexphase getrennt. Da sich die Flussschläuche, wie vorher erklärt, in einem Kupratsupraleiter wie weiche gekochte Spaghetti verhalten, sind sie grossen thermischen Fluktuationen ausgesetzt, und als Folge davon schmilzt das Vortexgitter an der Irreversibilitätslinie (Schmelzlinie). Bei hohen Magnetfeldern sind die thermischen Fluktuationen wegen des zweidimensionalen Charakters des Vortexsystems besonders ausgeprägt, und der Schmelzübergang findet bereits weit unterhalb der Sprungtemperatur statt. Diese Ergebnisse sind ganz neuen Datums und sind an der Universität Zürich experimentell mit Myonen-Spin-Resonanz, sowie an der ETHZ theoretisch gewonnen worden (4).

Sind die Flussschläuche beweglich, so wird bei Stromdurchgang durch den Supraleiter Energie verbraucht. Dies ist bei Hochstromanwendungen, wie im letzten Abschnitt besprochen wird, unerwünscht. Technisch wird deshalb versucht, die Flussschläuche zu fixieren, d. h. die Irreversibilitätslinie zu höheren Temperaturen und Magnetfeldern zu verschieben. Bis jetzt die beste Methode besteht darin, die Supraleiter der Bestrahlung hochenergetischer Ionen auszusetzen. Letztere «schiessen» Kanäle mit einem Durchmesser, der der Kohärenzlänge ξ etwa entspricht, ins Material. Die Kanäle sind nicht supraleitend und fixieren damit die Fluxonen. Auch kleine Kristalle von Fremdphasen der Dimension von einigen ξ eignen sich zum Fixieren.

3 MATERIAL: HERSTELLUNG UND KENNTNISSE

Die Suche nach neuen Verbindungen mit einem möglicherweise höheren Sprungpunkt T_c ist in den letzten Jahren weniger intensiv als nach der ursprünglichen Entdeckung betrieben worden. Auch gab es etliche Falschmeldungen, dass Supraleiter mit Phasenumwandlungen in der Nähe der Zimmertemperatur gefunden worden seien. Trotzdem gelang es in der Berichtsperiode einer Gruppe an der ETHZ (5), T_c im HgBa₂CaCu₃O₈ auf 133 K zu erhöhen, den weltweit höchsten Wert bei Normaldruck. Unter grossem Druck erhöht sich T_c auf 165 K. Daraus kann man erwarten, dass noch Verbindungen gefunden werden, welche auch bei Normaldruck ein ähnliches T_c aufweisen. Diese neuen und andere Höchst-T_c-Substanzen besitzen drei CuO₂-Ebenen pro Einheitszelle, die durch zwei Ca²⁺

Schichten getrennt sind. Wegen dieser grossen Einheitszellen gelingt es, auch unter Druck, nur kleinste Einkristalle von unter einem Millimeter Seitenlänge aus Schmelzen herzustellen. Trotzdem kann man an der ETH unter dem Mikroskop derart gute Elektroden anbringen, dass die anisotropen elektrischen und magnetoelektrischen Eigenschaften gemessen werden können. Die Winkelabhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität konnte kürzlich mit einer neuen Kantilevermethode an nur 400 ng schweren Kriställchen an der Universität Zürich bestimmt werden. Dies sind Fortschritte, wie man sie in diesem Ausmass vor kurzem nicht vorherzusagen wagte.

Die Güte bei der Herstellung von dünnen, nahezu einkristallinen Filmen war schon vor fünf Jahren erfreulich, mussten doch wegen des Sauerstoffs in den Verbindungen einzelne Verfahren gegenüber den bei den Halbleitern angewandten Methoden neu erarbeitet werden. Diese Filme von bis hinunter zu einatomarer Dicke werden mit einer Reihe von Techniken auf isolierende oxidische Substrate aufgedampft, kathodenerstäubt u.a.m. Wichtig ist, dass die Substrate nahezu gleiche Gitterkonstanten wie die Kupferoxydsupraleiter aufweisen, um elastische Spannungen zu vermeiden.

4 ANWENDUNGEN

4.1 Der Hochstrombereich

Heute sind ein halbes Dutzend Kupferoxyd-Supraleiter bekannt, welche ihren Sprungpunkt zwanzig und mehr Kelvingrade oberhalb der Temperatur des sehr billigen, flüssigen Stickstoffs besitzen. Ursprünglich schien es schwierig, mit diesen brüchigen Oxyden brauchbare Drähte für Hochstromanwendungen zu erzeugen. Man rechnete mit zwanzig und mehr Jahren Entwicklungszeit. In den letzten drei Jahren ist es gelungen, Mehrseelenkabel und Bänder von bis zu 1 km Länge zu ziehen, die im Test bis 4000 Ampere tragen können. Die Technologie besteht aus einem Silbermantel, in dem bis zu dreihundert Kupferoxydfilamente als Stromträger eingebettet sind.

In den letzten zwei Jahren konnte eine ganz andere Technologie zuerst in Japan, dann auch in den USA vorgestellt werden (6): Auf einem dünnen Band von biegsamem rostfreiem Stahl wird eine orientierte Schicht von stabilisiertem Zirkonoxid mittels Verdampfen durch Laserablation oder andere Techniken aufgebracht. Darüber wird eine dünne Kupratleiterschicht aufgetragen. Stromdichten von 1 Million Ampere pro cm^2 sind bei der Temperatur des flüssigen Stickstoffs gemessen worden. Ob solche Bänder, vorerst im Laboratorium erzeugt, in grossem Stil produziert werden können, muss sich erst weisen.

Mit der Herstellung von Hochstromleitern sind die Aussichten für die nähere Zukunft im Starkstrombereich beträchtlich gestiegen. So rechnet die American Superconductor Co. damit, Kabel für die Übertragung von elektrischer Energie im Jahre 2000 anbieten zu können. Diese Kabel sollten sich in den grossen

Agglomerationen, etwa für New York, Tokio usw. eignen, wo Freilufthochspannungsleitungen nicht möglich sind und Hochspannungsleitungen in Öldruckkabeln wegen des erforderlichen grossen Durchmessers, wie auch aus Gründen des Umweltschutzes wegen der Entzündlichkeit des Öls bei Durchschlägen, nicht erwünscht sind. Bis zum obigen Zeitpunkt sollten auch Motoren und Generatoren mit hohem Wirkungsgrad und kleinerem Volumen als die jetzt gebräuchlichen bereitstehen.

Vor der Jahrtausendwende hofft man, Transformatoren und Strombegrenzer anbieten zu können. Die jetzigen Erzeugnisse besitzen Ölkühlung und schwere Eisenkerne. Wie schon erwähnt, stellt Öl ein Umweltrisiko dar. Bei der neuen Technik würden die Eisenkerne ganz wegfallen, was eine Gewichtsersparnis von bis zu einem Faktor 3 bedeutet. Ausserdem werden die Abmessungen auf etwa die Hälfte schrumpfen. Es gibt noch weitere Anwendungen, wie die Energiespeicherung bei hohen Magnetfeldern mit Rotoren und Wechselstrom-Gleichstrom-Umformern. Letztere sollen schon übernächstes Jahr käuflich sein. Alles in allem rechnet eine japanische Schätzung, dass sich in der Branche bis zum Jahr 2020 ein Umsatz von 100 Milliarden Dollar ergibt.

4.2 Mikroelektronik

Gleich nach der Entdeckung wurde diesem Bereich bis zu den Anwendungen zeitlich eine Spanne vorhergesagt, welche mit derjenigen des Transistors vergleichbar sei. Bei letzterem sind vom erstmaligen Nachweis einer elektronischen Verstärkung bis zur Kommerzialisierung zehn Jahre vergangen. Nämlich, bis es gelang, von der ursprünglichen Germaniumtechnologie aus, mit ihren thermischen Instabilitäten, die Siliziumtechnologie zu beherrschen. Bei den Hochtemperatur-Supraleitern ist ebenfalls mit ersten marktfähigen Produkten 10 Jahre nach der Entdeckung der ersten Substanz, also 1996 zu rechnen. Dies wird möglich, da in den letzten vier Jahren, wie im Abschnitt über Materialien erwähnt, eine wesentliche Verbesserung beim Erzeugen von dünnen epitaktischen Schichten gelang.

Eine wichtige Anwendung ist das supraleitende Quanteninterferometer (SQUID). Es besteht aus zwei parallel geschalteten Josephson-Tunnelnioden und arbeitet wie ein optisches Zweischlitz-Interferometer, da ja die supraleitende Wellenfunktion eine makroskopische Grösse ist und eine Josephsondiode einem optischen Schlitz entspricht. Mit einem SQUID lassen sich schwächste Magnetfelder nachweisen. Solche Magnetometer, mit klassischen Supraleitern gefertigt, waren schon seit gut drei Jahrzehnten im Gebrauch, mussten aber mit dem teuren flüssigen Helium gekühlt werden. Die mit Hoch- T_c -Supraleitern mittelst dünnen Schichten erzeugten SQUIDs erreichen nun ein Signal-Rausch-Verhältnis, welches mit jenen kommerzieller Tieftemperatur-SQUIDs vergleichbar ist. Die Hochtemperatur-SQUIDs sind jetzt im Handel erhältlich und werden teilweise mit einfachen Kryokühlern betrieben. Weiter sind ebenfalls auf der Basis von Kupfer-

oxyd-SQUIDs digitale Impulsschieber gebaut worden. Sie erreichen Frequenzen von 100 GHz, was mit Halbleitern wohl kaum zu bewerkstelligen ist.

Bis etwa 100 GHz sind die Mikrowellenverluste der Kupratsupraleiter geringer als diejenigen von entsprechend gekühlten Drähten und Schichten aus metallischem Silber oder Kupfer. Somit wurden mit den Hoch- T_c -Supraleitern Hochfrequenz-Spulen und -Resonatoren hergestellt, welche eine wesentlich höhere Güte aufweisen. Mit solchen Spulen bestückte Kernresonanzdetektoren in Tomographen haben ein etwa dreimal besseres Signal-Rausch-Verhältnis als die metallischen. Darum muss sich der Patient nur noch ein Drittel so lange wie früher im Tomographen aufhalten, was für ihn angenehmer und für die Untersuchung von Vorteil ist. Weiter wird sich pro Tag die Anzahl der Patienten etwa verdreifachen, was die Kosten für die heute sehr teuren Analysen senken dürfte.

Wegen der sehr hohen Güte von Resonatoren können die Trennabstände von Telefonfiltern in Zentralen verkleinert und damit die Dichte des Übertragungsnetzes erhöht werden. Auch die Abstrahlverluste von mit Kupratsupraleitern beschichteten Antennen von Telekommunikationssatelliten sind bis zu viermal kleiner als diejenigen mit unbeschichteten Metallantennen. Die mittlere Temperatur eines Satelliten ist bei günstiger Standortwahl 120–150 K, und so ist die Antenne leichter unter die Sprungtemperatur des Supraleiters zu kühlen. Der Umsatz bis 2020 wird im gesamten Mikroelektronikbereich ebenfalls auf 100 Milliarden \$ geschätzt. (Für detaillierte Angaben zu diesem Abschnitt s. G.B. Lubkins, *Physics Today*, März 1995, S. 20–23)

5 SCHLUSSBEMERKUNG

Es war der Wunsch der Herausgeber dieser Jubiläumsveröffentlichung, möglichst auf ein umfassendes Literaturverzeichnis zu verzichten. Diesem Wunsche ist der Autor nachgekommen. Die zitierten Arbeiten sollen jedoch dem interessierten Leser helfen, den Anschluss an die Literatur zu finden. Aus den angegebenen Veröffentlichungen geht hervor, dass die Forschung in Zürich in letzter Zeit wesentlich zum Verständnis der Hochtemperatursupraleitung beigetragen hat. Es wäre leicht möglich gewesen, die Anzahl der Zitate wichtiger Zürcher Arbeiten zu verdoppeln, und es hätte auch dem Bedürfnis des Verfassers dieses Artikels entsprochen.

Literatur

- (1) K.A. MÜLLER, 1991. – *Physica C 185–189*, 3–10.
- (2) K.A. MÜLLER, 1995. – *Nature 377*, 133.
- (3) Phase Separation in Cuprate Superconductors. (a) K.A. MÜLLER & G. BENEDEK (Eds.), 1993. Proc. (First) Workshop 1992 in Erice. – World Scientific, Singapore.
(b) E. SIGMUND & K.A. MÜLLER (Eds.), 1994. Proc. Sec. Workshop 1993 in Cottbus. – Springer, Berlin.
- (4) S.L. LEE et al., 1995. – *Phys. Rev. Lett.* 75, 922.
- (5) A. SCHILLING et al., 1993. – *Nature 363*, 56.
- (6) P.M. GRANT, 1995. – *Nature 375*, 107.